



**Stefan Bringezu**

# **Die Analyse der Materialintensität von Infrastrukturen**

**zur Unterstützung eines integrierten  
Ressourcenmanagments**

**Nr. 102 • April 2000**  
ISSN 0949-5266

**Wuppertal Papers**

Anregungen, Kommentare und Kritik bitte an:

Dr. Stefan Bringezu  
Wuppertal Institut  
Postfach 10 04 80  
D-42004 Wuppertal

tel. +49(0)202 2492-131  
fax. +49(0)202 2492-138  
email: [stefan.bringezu@wupperinst.org](mailto:stefan.bringezu@wupperinst.org)

## **Die Analyse der Materialintensität von Infrastrukturen zur Unterstützung eines integrierten Ressourcenmanagements<sup>1</sup>**

Stefan Bringezu

### Zusammenfassung

Die Wirkungen von Stoffströmen sind abhängig von der umgesetzten Menge und den spezifischen Auswirkungen pro Mengeneinheit. Die Menge der Extraktion an Primärmaterial aus der Umwelt kann als vorsorgeorientierter Indikator für ein unspezifisches Umweltbelastungspotential herangezogen werden. Die Materialintensitäts-Analyse ermittelt den kumulierten Materialaufwand (=Material Input) nach fünf Hauptkategorien und setzt diesen in Beziehung zum gewünschten Nutzen (= pro Service-Einheit). Beispielhaft wird die Materialintensität verschiedener Systeme der Energieversorgung und des Wasser- und Abwasser-managements verglichen. Ein integriertes Ressourcenmanagement schließt bei einer umfassenden Systemsicht neben einer Minimierung des Ressourcenaufwandes auch die Verminderung kritischer Emissionen ein. Es erfordert ein sektorübergreifendes Stoffstrommanagement und die Berücksichtigung ökonomischer, technologischer, organisatorischer und sozialer Aspekte sowie der regionalen Besonderheiten. Ansätze hierzu werden vorgestellt.

Stichworte: Stoffströme, Umweltwirkungen, Indikatoren, Materialintensität, MIPS, Integriertes Ressourcenmanagement, Ver- und Entsorgungssysteme, Elektrizität, Wasser, Abwasser, Schadstoffemissionen, Nährstoffe, Recycling

## **Analysis of Material Intensity of Infrastructures to Support an Integrated Resource Management<sup>2</sup>**

Stefan Bringezu

### Abstract

The impacts of material flows depend on the flow volume and the specific impacts per unit of flow. The volume of primary materials extracted from the environment can be used as an indicator of unspecific impact potential. Material intensity analysis determines the cumulative material requirements (= Material Input) according to five main categories. The input is related to the utility and normalized on a per service basis. As examples, the material intensity of different systems for energy supply and for water and waste water management is compared. Based on a comprehensive systems perspective Integrated Resource Management comprises minimization of resource requirements as well as reduction of critical emissions. It demands for a sector encompassing material flow management and also considers economical, technological, organisational and social aspects with regard to regional specificities. Approaches to this end are being described.

Key words: material flows, environmental impacts, indicators, material intensity, MIPS, Integrated ResourceManagement, supply and waste management systems, electricity, water, waste water, pollutant emissions, nutrients, recycling

---

<sup>1</sup> schriftliche überarbeitete Fassung eines Abschlußvortrages im Rahmen eines Habilitationsverfahrens am Fachbereich Umwelt und Gesellschaft der TU Berlin am 23. Juni 1999

<sup>2</sup> Amended text version of the final lecture of a habilitation procedure at the Faculty for Environment and Society of the Technical University Berlin on June 23rd 1999

## **Einleitung - Stoffströme und Umweltbelastungen**

Nach Kant gibt es keine Wissenschaft, der nicht eine Idee zugrunde läge<sup>3</sup>. Die wissenschaftlichen Ansätze, von denen hier die Rede sein soll, gehen von der Idee aus, dass es dem Menschen möglich ist, die physische Grundlage seines Seins auf der Welt in nachhaltiger Weise zu gestalten und dass es Aufgabe von Wissenschaft ist, dafür die geistigen Grundlagen und methodischen Hilfsmittel zu schaffen.

Die physische Basis unserer Wirtschaft wird wesentlich von ihrem Stoffdurchsatz, genauer durch ihren Stoffwechsel mit der Umwelt, bestimmt. Jedes Jahr werden der Umwelt bestimmte Rohmaterialien entnommen, mehr oder weniger verarbeitet und genutzt und früher oder später in Form von Abfällen und Emissionen meist in veränderter Form und an anderen Stellen wieder in die Umwelt entlassen.

Wir wissen heute, dass dieser Stoffwechsel in seiner derzeitigen Quantität und Qualität sowie in seiner funktional-räumlichen Struktur auf Dauer nicht aufrecht erhalten werden kann. Die Ressourcenentnahme basiert überwiegend auf nicht erneuerbaren Stoffen. Die Abgabe von Emissionen übersteigt die Aufnahmekapazität der Umweltmedien. Die Technosphäre wächst physisch (weil der Input den Output übersteigt) und verdrängt zunehmend natürliche lebenserhaltende Funktionen des Gesamtsystems. Ökonomisch prosperierende Regionen verlagern ihre Umweltprobleme in ärmere Regionen (z.B. bei der Erzgewinnung) oder auf die globale Gemeinschaft (z.B. beim Klimaproblem). Beim Ressourcenverbrauch pro Kopf liegen industrialisierte Gesellschaften an der Spitze. Eine Übertragung der bestehenden Technologien der Industrieländer auf den Rest der Welt - wie sie derzeit in vollem Gange ist - wäre mit Zuwächsen der Ressourceninanspruchnahme verbunden, deren Folgen auf das Gesamtsystem kaum zu überschauen sind. Allerdings muss man davon ausgehen, dass eine solche Entwicklung die Lebens- und Wirtschaftsbedingungen deutlich verschlechtern wird.

Geht man von der Hypothese aus, dass der Mensch seine Aktivitäten so ausrichten kann, dass die Umwelt in ihren wesentlichen Funktionen nicht nachhaltig gestört wird, und dass er dazu geeigneter Informationen bedarf, so besteht eine zentrale Aufgabe darin, (a) die mit verschiedenen Handlungen bzw. Planungen verbundenen Wirkungspotentiale zu analysieren und (b) diese Informationen für die verschiedenen Akteure entscheidungsgerecht bzw. planungsadequat aufzubereiten.

---

<sup>3</sup> Kant, I. (1787): Die Architektonik der reinen Vernunft. In: Kritik der reinen Vernunft. 2. Aufl., Riga. Herausgeg. von G. Martin et al., Reclam, Stuttgart

Nahezu sämtliche Einwirkungen des Menschen auf die Umwelt werden über Stoffflüsse vermittelt. Die verschiedenen Stoffflüsse können dabei mit sehr *verschiedenen Wirkungen* verbunden sein.

Die Auswirkungen von Stoffflüssen können toxischer Art sein. Ein in die Umwelt eingetragener Stoff liegt dort in Konzentrationen vor, die zu bestimmten akuten oder chronischen Schädigungen führt. Wirkungen auf den Ernährungszustand können dadurch ausgelöst werden, dass Nährstoffe wie z.B. Stickstoff- und Phosphatverbindungen, die in Gewässer eingetragen werden, dort zu Überdüngungseffekten führen. Mechanische Zerstörungen sind die Folge jeder Baumaßnahme, jeder Einrichtung einer Abbau- oder Anbaufläche. Hier wird das vorhandene Arteninventar i.d.R. ausgelöscht, die vorhandene Bodenstruktur zerstört und die jeweilige Fläche bei Überbauung häufig versiegelt. Auch biotische Strukturen, die für die Stabilität und Resilienz von Ökosystemen wichtig sind, können beeinträchtigt werden. Beispielsweise kann es durch die Zerschneidung von natürlichen Lebensräumen infolge von Baumaßnahmen insbesondere des Verkehrs zu einer Verminderung der Biodiversität kommen. Beispiele physiko-chemischer Effekte sind der anthropogene Treibhauseffekt infolge vermehrter Absorption von Wärmestrahlung in der Atmosphäre aufgrund erhöhter Kohlendioxidkonzentrationen infolge der Verbrennung fossiler Energieträger ebenso wie der Abbau von stratosphärischem Ozon durch langlebige Fluorchlorkohlenwasserstoffe.

Alle diese Wirkungen unterscheiden sich in ihrem räumlich-zeitlichen Einwirkungsmuster sowie hinsichtlich ihrer Wahrnehmbarkeit. Sie können lokal, regional bis global wirksam sein, kurz- und langfristige Effekte hervorrufen, direkte oder indirekte Folgen auslösen. Dies macht es generell sehr schwierig, genaue *Wirkungspotentiale* zu beschreiben, also prognostische Aussagen über mögliche Effekte in der Zukunft zu treffen.

Generell ist die Umweltbelastung (UB) eines Stoffflusses abhängig von der in einem Zeitraum bzw. für ein bestimmtes Produkt (z.B. eine Infrastruktur) umgesetzten Menge sowie der spezifischen Umweltbelastung pro Mengeneinheit:

$UB = Menge \times \frac{\text{Spezifische UB}}{\text{Mengeneinheit}}$
--

Wenn beide Parameter bekannt sind, lässt sich auch die zu erwartende Umweltbelastung bestimmen. Jedoch: die Erfahrung lehrt, dass wir davon ausgehen müssen, nur einen Teil der Wirkungen menschlichen Handelns auf die Umwelt zu kennen und diesen Teil auch nur mit einer erheblichen Zeitverzögerung wahrnehmen (individuell, wissenschaftlich und gesellschaftlich). Dazu kommt, dass nur für einen Teil der bekannten Wirkungen Testverfahren

zur reproduzierbaren Analyse, z.B. über Dosis-Wirkungs-Beziehungen, zur Verfügung stehen. Bei den Auswirkungen von Tagebauen ist dies z.B. nicht ohne Weiteres möglich.

Eine wesentliche Ursache für die Schwierigkeit der Prognose von Umweltwirkungen liegt in der Komplexität der Wirkungszusammenhänge in natürlichen Ökosystemen ebenso wie in der Komplexität der Wechselwirkungen innerhalb der Anthroposphäre. Dadurch wird auch die Zuordenbarkeit bestimmter Effekte zu bestimmten Handlungen erschwert.

Die gestellte Aufgabe wird dadurch nicht einfacher, dass (a) die gleichen Wirkungen durch unterschiedliche Aktivitäten zustande kommen können (z.B. eine Förderung des Treibhauseffekts durch das Verbrennen fossiler Energieträger bzw. die Emission von Methan aus der Rinderhaltung), und (b) die gleichen Aktivitäten verschiedene Wirkungen auslösen können (z.B. ist die Verbrennung von Braunkohle nicht ohne eine Devastierung der Abbauf Flächen, eine Erhöhung des Treibhauseffekts, die Absenkung des Grundwassers usw. möglich).

Gleichwohl ist es möglich, für bestimmte bekannte Wirkungen, spezifische Wirkungspotentiale zu quantifizieren und bestimmten Prozessen zuzuordnen (z.B. das Säurepotential von Emissionen, oder das ODP für ozonabbauende Substanzen). Dies ist aber längst nicht für alle bekannten Wirkungen möglich (z.B. nicht für Auswirkungen auf die Biodiversität), so dass dieser Ansatz lückenhaft bleibt. Dazu kommt, dass die spezifischen Wirkungspotentiale sich in aller Regel auf Emissionen in die Umwelt beziehen. Gegenmaßnahmen, die auf dieser Informationsbasis getroffen werden, sind damit auf das Ende der Stoffflüsse durch die Anthroposphäre – *the end of the pipe* - orientiert. Dies führte in der jüngeren Historie zum Einsatz von eher nachgeschalteten Technologien. Da Reinigungs- und Filteranlagen mit zusätzlichem Ressourcenverbrauch und Emissionen an anderen Orten verbunden sind, ist damit auch eine gewisse räumlich-zeitliche Problemverlagerung verbunden.

Der Bezug auf bekannte, bereits manifest gewordene Wirkungen fördert zudem generell eine eher re-aktive Strategie umweltpolitischen Handelns. Dem Risiko noch nicht offenbar gewordener Wirkungen im Sinne einer vorsorgenden Planung kann auf diese Weise nicht begegnet werden.

Will man diesem Anspruch gerecht werden, so muss das Umweltbelastungspotential menschlicher Aktivitäten und Planungen (auch) mit Hilfe von *wirkungsunspezifischen* Indikatoren abgebildet werden. Wenn aber über die spezifischen Wirkungen pro Mengeneinheit der Stoffflüsse nichts oder zu wenig bekannt ist, um sie hinreichend zu quantifizieren, so übernimmt der Umfang (die Menge bzw. das Volumen) des Stoffstromes die entscheidende Indikatorenfunktion.

Der Satz des Boambastus von Hohenheim<sup>4</sup>, genannt Paracelsus, dass die Dosis - also die Menge pro Zeiteinheit - bestimmt, was ein Gift ist, stimmt in übertragenem Sinne auch für die Umwelt. Und zwar für den Eintrag von Stoffen ebenso wie für deren Extraktion.

Soll der Umfang eines Stoffstromes ein Indikator für unspezifische Umweltbelastungen sein, der die genannten Defizite spezifischer Indikatoren ausgleicht, so müßte für das betrachtete System die Erfassung möglichst aller Mengenströme angestrebt werden, die möglichst nahe an den Prozessen liegen, welche die Umwelteinwirkungen auslösen.

Der Prozeß, der am Anfang anthropogener Stoffflüsse steht, ist die Entnahme von Primärmaterial aus der Umwelt. Eine Verringerung der in der Folge entstehenden Umweltbelastungen ist ohne eine Verringerung des Umfangs dieser Ressourcenentnahme nicht möglich, die quasi dem Basisglied in der Kette darauf folgenden Prozesse entspricht. Positiv ausgedrückt kann man für das System Anthroposphäre von der Nullhypothese ausgehen, dass mit zunehmendem Umfang der Ressourcenentnahme das Risiko schädlicher Wirkungen steigt.

Damit kommt dem Umfang der Ressourcenentnahme an Primärmaterial eine entscheidende Rolle bei der Abbildung unspezifischer Umweltbelastungen und der Ableitung vorsorgeorientierter Indikatoren zu.

Auf der Ebene nationaler und regionaler Wirtschaftsräume wurde ein solcher Indikator bereits für internationale Vergleiche genutzt (Bringezu 2000). Die empirischen Zahlen des *Globalen Materialaufwandes* (GMA) ergeben derzeit ca. 70 t pro Kopf an jährlicher Ressourcenextraktion (ohne Wasser und Luft) durch industrialisierte Länder wie z.B. Deutschland, USA, Japan und die Niederlande. Nicht zuletzt vor dem Hintergrund der Frage, was passieren würde, wenn die mit diesem Ressourcenaufwand verknüpften Technologien und die Art und der Umfang der Produktion auf der ganzen Welt eingesetzt würden, belegen solche Befunde die Plausibilität von Empfehlungen für die politische Zielebene, den Ressourcenverbrauch industrialisierter Länder innerhalb von 30 bis 50 Jahren um einen Faktor 4 bis 10 zu vermindern, die Wirtschaft zu dematerialisieren und die Ressourcenproduktivität entsprechend zu steigern. Diese Zielvorschläge wurden mittlerweile von verschiedenen internationalen Organisationen unterstützt und fanden Eingang in nationale umweltpolitische Programme (z.B. in Österreich, Finnland). Von der Tendenz gilt dies auch für den Entwurf des BMU für ein umweltpolitisches Schwerpunktprogramm von 1998. Hier wird eine Erhöhung der Rohstoffproduktivität um einen Faktor 2,5 bis 2030 vorgeschlagen (Basisjahr 1993).

---

<sup>4</sup> Philippus Aureolus Theophrastus (1493 - 1541)

Das Ziel einer Dematerialisierung insbesondere industrialisierter Wirtschaften wird i.d.R. mit einer Strategie der Steigerung der Ressourceneffizienz bzw. Ressourcenproduktivität verknüpft. Dadurch soll erreicht werden, dass der materielle Wohlstand bei sinkender Umweltbelastung gewährleistet bleibt und ein wirtschaftliches Wachstum nicht automatisch zu einer erhöhten Ressourcenbelastung führt.

Die Umsetzung dieser Strategie setzt voraus, dass das Verhältnis von Ressourcenaufwand zu erzieltm Nutzen entsprechend der jeweiligen Zielfaktoren verringert wird. Dies verlangt eine Überprüfung und Weiterentwicklung aller ressourcenintensiven Technologien. Eine Breitenwirksamkeit setzt zudem voraus, dass bereits bei der Entwicklung bzw. Planung neuer Dienstleistungen, Produkte, Anlagen und Infrastrukturen der Aufwand an Primärmaterial möglichst umfassend ermittelt und ins Verhältnis zu dem jeweils erzielten Nutzen gesetzt wird.

Hierzu soll die Methode der Materialintensitätsanalyse dienen, die im Folgenden kurz vorgestellt werden soll.

### **Die Methode der Materialintensitäts-Analyse (MAIA)**

Die MAIA basiert auf dem MIPS-Konzept (Schmidt-Bleek et al. 1998). Es wird der lebenszyklusweite Primärmaterialaufwand oder Material Intput ermittelt, der für die Bereitstellung - pro - einer bestimmten Service- oder Nutzeneinheit aufgewandt wird. Somit wird für Produkte, Anlagen oder Infrastrukturen der kumulierte Materialaufwand für deren Herstellung, Gebrauch und Entsorgung bestimmt. Dieser wird normiert auf die jeweilige funktionelle Nutzen- bzw. Service-Einheit.

Die lebenszyklusweite Betrachtung garantiert, dass die Systemgrenze auf der Input-Seite funktional dort bestimmt wird, wo der Mensch zum ersten Mal mit Hilfe von Technologie in die Umwelt eingreift. Dadurch dass die Analyse der Prozeßketten an politischen Grenzen nicht Halt macht, wird eine regionale Verlagerung von Umweltbelastungen mit erfasst.

Die Material Input Daten werden über die gesamte Prozesskette zusammengefaßt und zu fünf Hauptkategorien aggregiert: abiotische Rohmaterialien, biotische Rohmaterialien, Boden, Wasser und Luft (ABBILDUNG 1).



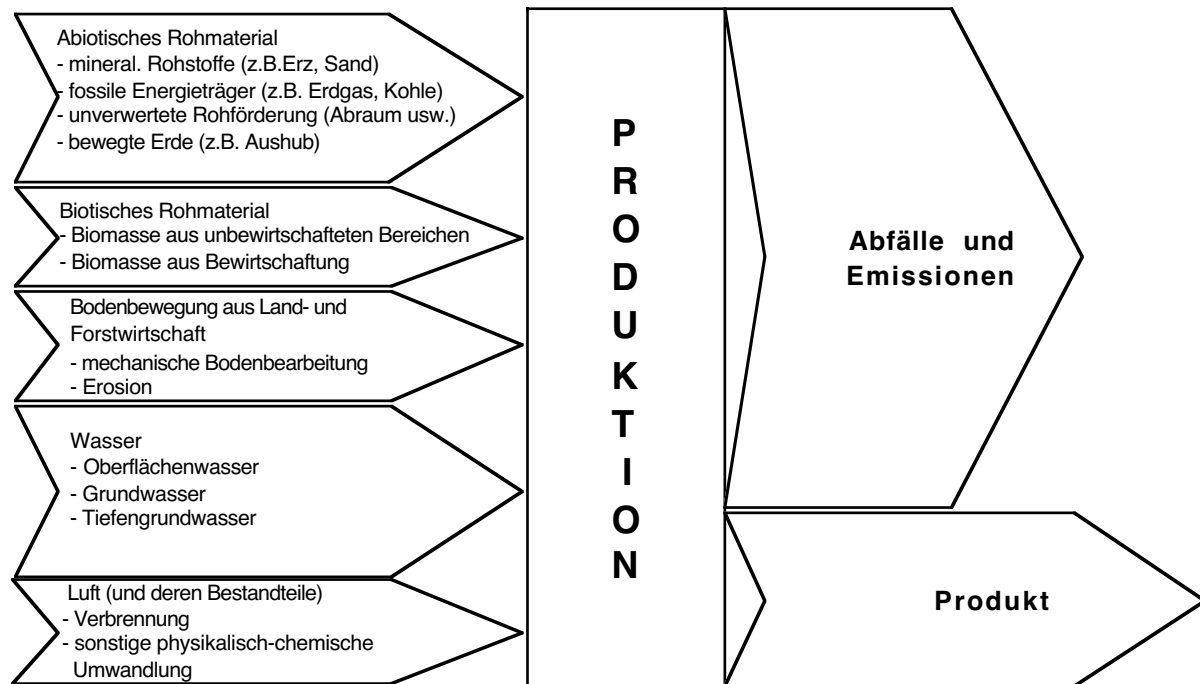


ABB. 1. Die Erfassungskategorien der Materialintensitäts-Analyse von Produkten (einschl. Infrastrukturen).

- Die *abiotischen Rohmaterialien* umfassen Erze, Bau- und Industriemineralien, Energieträger sowie die zu ihrer Förderung extrahierten Erdmassen wie Abraum und Extraktionsabfall. Ebenso einbezogen wird der Erdaushub für die Errichtung von Bauten und Infrastrukturen.

Diese Stoffbewegungen werden einbezogen, weil auch damit in der Regel erhebliche lokale Umweltbelastungen verbunden sein können. Die systemweite Erfassung der anthropogenen Mengenflüsse soll - wie bereits dargelegt - möglichst umfassend sein. Bei der Entnahme von Primärmaterial liegen zunächst alle Stoffe in virgenem Zustand, d.h. mit Zurichtungsgrad Null vor. Daher erscheint die Aggregation dieser Entnahmen aus der Erdkruste in der Kategorie abiotisches Material gerechtfertigt. Spezifische Umwelteffekte infolge von Abtrennung und Verarbeitung wären über wirkungsspezifische Indikatoren, z.B. der Toxizität, abzubilden.

- Biotische Rohmaterialien* umfassen die Ernte pflanzlicher Biomasse sowie den Fischfang und die Jagd. Produzierte tierische Biomasse wird auf die zu ihrer Erzeugung eingesetzte grüne Biomasse zurückgerechnet. Dies ist für die folgende Analyse der Materialintensität von Infrastrukturen jedoch ohne Belang.
- Bei der Kategorie *Boden* wird die Erosion auf landwirtschaftlichen oder forstwirtschaftlichen Flächen berücksichtigt. Für einzelne Studien wurde die gepflügte Erde erfaßt. Auch dies ist im Folgenden jedoch nicht von Relevanz.

- Bei der Kategorie *Wasser* wird die Abzweigung bzw. die Entnahme von Wasser vom natürlichen Wasserpfad bzw. aus Reservoirern in Anrechnung gebracht. Berücksichtigt wird Grund-, Oberflächen- und Niederschlagswasser.
- Bei der Kategorie *Luft* wird der Anteil gezählt, der durch die jeweiligen Prozesse chemisch-physikalisch umgewandelt wird. In der Regel stellt der Sauerstoffanteil für die Verbrennung fossiler Energieträger den Hauptanteil des Luftinputs dar. Damit handelt es sich im wesentlichen um Verbrennungsluft bei der Energiegewinnung. Die resultierende Werte sind deshalb zumeist proportional zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß, so daß die MAIA in der Regel zugleich Aussagen über einen der wichtigsten Emissionsströme erlaubt.

Alle Inputs, Energieträger wie Nichtenergieträger werden auf die gemeinsame Masse-Einheit (t bzw. g) bezogen. In Analogie zur Analyse des kumulierten Energieaufwandes besteht hier das Hauptinteresse in der Quantifizierung der Menge des kumulierten Materialaufwandes (ohne dass deshalb eine stoffliche Identität der verschiedenen Materialien in den aggregierten Kategorien unterstellt würde oder gefolgert werden könnte).

Der „ökologische Rucksack“ eines Produkts oder einer Anlage entspricht der Primärmaterialentnahme, die nicht in das Produkt oder die Anlage selbst eingeht.

Eine Aggregation der 5 Kategorien wird generell abgelehnt, da die mit diesen verbundenen Eigenschaften - hinsichtlich ihrer Genese, Mobilität sowie Einbindung in natürliche Stoffkreisläufe - als zu unterschiedlich bewertet werden. Eine solche Aggregation würde somit keine richtungssicheren Aussagen zur Förderung einer Dematerialisierung der Wirtschaft erlauben<sup>5</sup>. Aufgrund der empirischen Mengenrelationen würde die Aggregation zu einer einzigen Zahl praktisch nur die Wasserentnahmen abbilden.

---

<sup>5</sup> Eine Aggregation von allen Primärmaterialentnahmen „ohne Wasser und Luft“ hat sich auf volkswirtschaftlich-regionaler Ebene als vertretbar und praktikabel erwiesen (Bringezu 2000). So umfasst der Globale Materialaufwand GMA (engl. TMR) die Kategorien abiotische und biotische Rohmaterialien sowie Boden (nur als Erosion). Bei den gegenwärtigen Verhältnissen ist der GMA durch die abiotischen Entnahmen dominiert. Umsetzungsmaßnahmen, die auf die Verminderung des GMA abzielen, erlauben eine vermehrte Nutzung erneuerbarer Ressourcen, ohne einen damit verbundenen Hauptstressor, die Erosion, zu vernachlässigen.

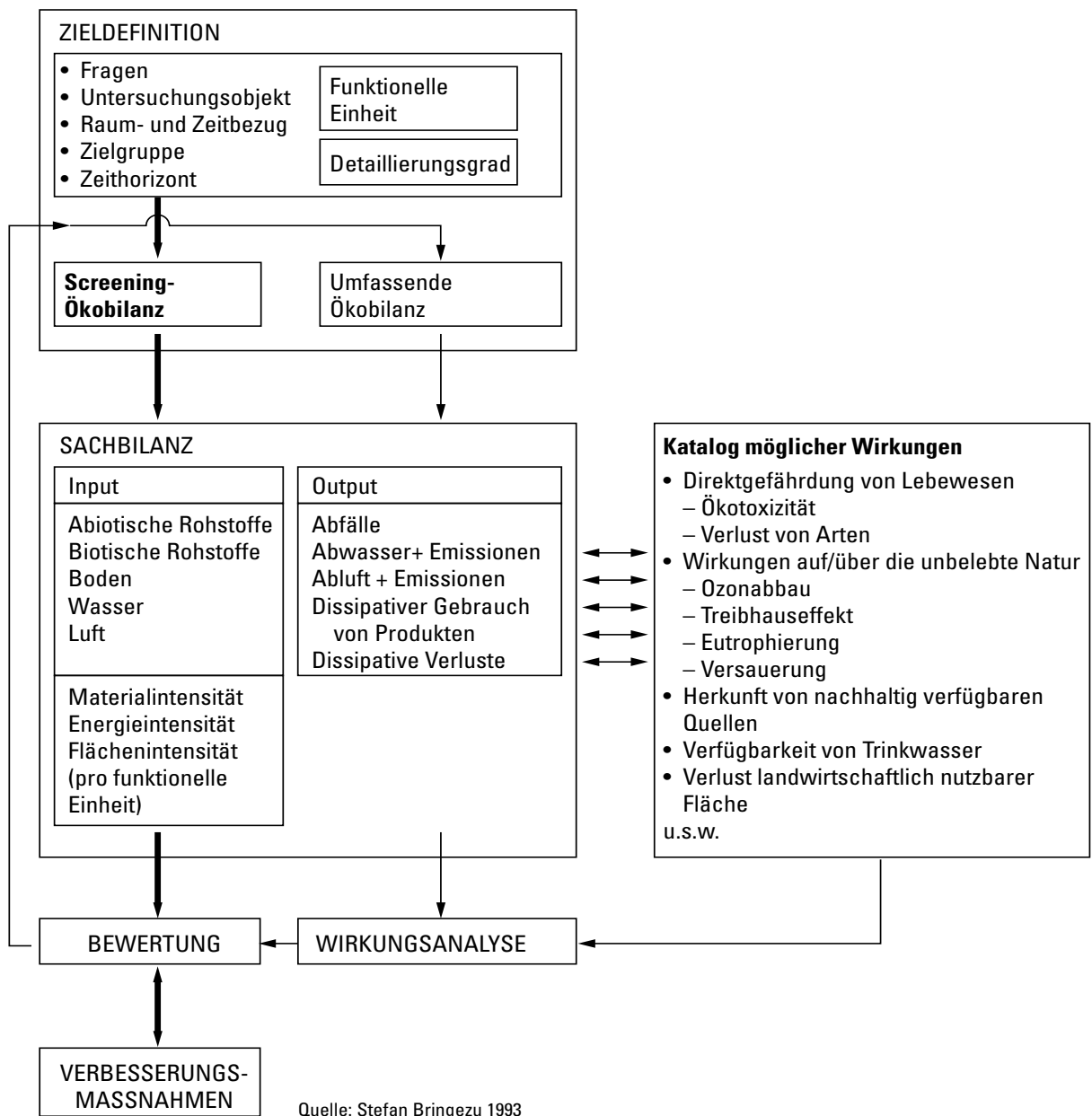


ABB. 2. Ressourcenintensitäts-Analyse (Material, Energie, Fläche) als Eingangsstufe der Ökobilanzierung

Die Materialintensitätsanalyse wurde als ein Verfahren entwickelt, das es erlauben soll, eine erste Abschätzung der Größenordnung von stoffstrombedingten Umweltbelastungen durchzuführen. Sie wurde deshalb - in Verbindung mit der Energie- und Flächenintensitätsanalyse - auch als Eingangsstufe der Ökobilanzierung vorgeschlagen (Bringezu et al. 1996). Als wesentlicher Vorteil gegenüber einer vollständigen Ökobilanz wird es erachtet, dass die meisten der inputbezogenen Prozessdaten in der Regel bereits vorhanden sind oder einfacher, schneller, billiger und genauer zu erheben sind als die Daten zu Emissionen und Abfällen. Damit könnte man in einer ersten Stufe die wesentlichen Größenordnungen des Ressourcenverbrauchs für eine breite Palette von Produkten bzw. Anlagen bestimmen. In vielen Fällen dürften die

ermittelten Unterschiede zwischen den Varianten für eine Bewertung ausreichen. Wenn dies nicht der Fall ist oder wenn zusätzliche Aspekte spezifischer Umweltgefährdungen in das Blickfeld rücken, so muss eine umfangreichere und detailliertere Analyse durchgeführt werden.

Die MAIA ersetzt nicht die Analyse spezifischer Umweltbelastungen und -wirkungen. Sobald Anzeichen vorliegen, dass die generelle Hypothese, dass eine Verminderung des Material Input auch zu einer Verminderung von Umweltbelastungen führt, im speziellen Fall nicht zutrifft, so muss dies näher geprüft werden.

### **Beispiel Energieinfrastrukturen: Windkraft**

Energieinfrastrukturen sind insofern von besonderer Bedeutung für den Stoffhaushalt der Wirtschaft, als beispielsweise in Deutschland der GMA, also der Material Input ohne Wasser und Luft, 1996 noch zu 44 % von der Energieversorgung bestimmt wurde. Daher liegen hier besonders hohe Potentiale der Dematerialisierung.

Bei einem mittelständischen Küchenhersteller im Bergischen Land wurden im Rahmen eines Öko-Audit-Verfahrens u.a. die Energiebereitstellungssysteme mittels MAIA untersucht (ABBILDUNG 3).

Verglichen wurde insbesondere die Materialintensität der Elektrizität aus dem betriebseigenen Windenergiekonverter mit jener aus der öffentlichen Versorgung sowie aus industriellen Kraftwerken. Die Daten beziehen jeweils die Errichtung und den Betrieb der Anlagen ein. Der Material Input für die Elektrizität aus der öffentlichen Versorgung basierte auf der Analyse aller gängigen Kraftwerkstypen (Manstein 1995).

Dies zeigt, dass (1) auch erneuerbare Energien nur mit einem bestimmten Aufwand nicht erneuerbarer Materialien genutzt werden können (2) dass in diesem Fall der mit Windenergie erzeugte Strom deutlich materialextensiver ist als die in konventionellen Großkraftwerken erzeugte Elektrizität. Die Faktoren der Reduktion liegen im Vergleich zu Kraftwerken der öffentlichen Versorgung bei über 150, über 1000, über 30 für die 3 Hauptkategorien abiotische Materialien, Wasser und Luft (das letztere bedeutet zugleich eine entsprechende Verminderung der CO<sub>2</sub> Emissionen).

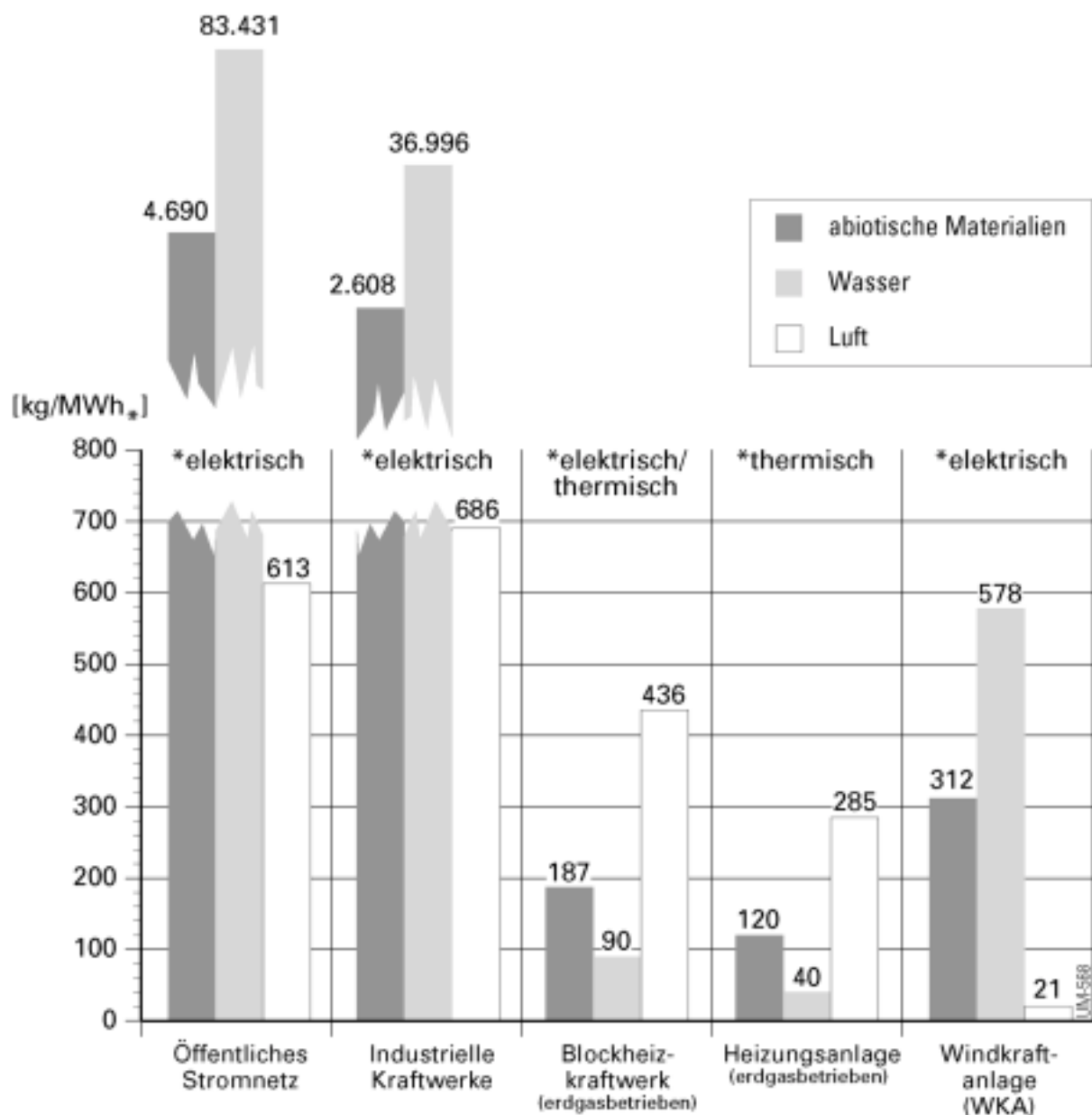


ABB.3. Die Materialintensität verschiedener Energieversorgungssysteme (Manstein in Liedtke et al. 1996 sowie zusätzliche Berechnungen).

Das technische Potential zur Nutzung der Windkraft macht ca. ein Drittel des regenerativen Potentials zur Stromerzeugung in Deutschland aus (welches insgesamt Mitte der neunziger Jahre ca. das Doppelte des aktuellen Verbrauchs darstellte). Gleichwohl kann die Windkraft aufgrund der diskontinuierlichen Verfügbarkeit, der hohen Flächeninanspruchnahme und der regional unterschiedlichen Windpotentiale auch künftig nur einen Teil des Strombedarfs decken. Eine zukunftsfähige Energieversorgung setzt vor allem einen effizienteren Umgang mit Endenergie und eine Minderung des Gesamtverbrauches an Strom und Wärme voraus. Dabei wird

allerdings in Zukunft das Verhältnis von erneuerbaren zu nicht erneuerbaren Energieträgern schrittweise zu erhöhen sein.

Im Zuge dieser Entwicklung kann die MAIA die Planung von Energieversorgungssystemen unterstützen, indem je nach benötigtem Mix an Strom und Wärme die materialextensivste Variante ermittelt wird. Und wenngleich die o.g. Daten zur Materialintensität von Energiesystemen aus der ersten Hälfte der neunziger Jahre stammen, so sind die dargestellten Relationen auch zur Jahrhundertwende in ihrer Größenordnung noch valide. Sie unterstützen damit die Bestrebungen, die regional verfügbaren Potentiale der Windkraft zunehmend für die anteilswise Deckung der Elektrizitätsversorgung im Grundlastbereich zu nutzen und dafür in angemessenem Umfang Vorrangflächen auszuweisen, wie es z.B. im niedersächsischen Raumordnungsprogramm<sup>6</sup> vorgesehen ist.

### **Abwasserbehandlungssysteme**

Bei der Abwasserbehandlung liegt das traditionelle Interesse - entsprechend ihrer ursprünglichen Funktion - bei der Verminderung des Eintrags von Schadstoffen in die Gewässer und der Verbesserung der Wasserqualität. Hier kann eine MAIA genutzt werden, um die herkömmliche Betrachtung deutlich zu erweitern. Die MAIA erlaubt es, auch den gesamten Ressourcenaufwand für die Errichtung und den Betrieb der Anlage mit einzubeziehen.

Die Errichtung von Kläranlagen und Kanalisationen ist mit erheblichen Baustoffströmen verbunden. Der gesamte Baubereich war 1996 in Deutschland mit 22 % am GMA beteiligt durch die Extraktion von Baumineralien und Aushub.

Untersucht wurde im vorliegenden Fall von Reckerzügl (1997) eine moderne *kommunale Kläranlage* (VARIANTE 1) in Marienheide im Sauerland, zu der der Wupperverband die Daten zur Verfügung stellte.

Verglichen wurde damit ein projektiertes *semizentrales Abwassersystem* in Lübeck Flintenbreite (VARIANTE 2). Dort wird für 100 Wohneinheiten eine Siedlung gebaut, die auch als dezentrales Projekt der Expo-2000 nominiert ist<sup>7</sup>. Die in der kommunalen Anlage zusammengefassten Abwasserströme Fäkalien, Regenwasser und Grauwasser werden hier getrennt gesammelt und behandelt (ABBILDUNG 4). Die *Fäkalien* werden über Vakuumleitungen (Sammlung wie bei ICEs, Flugzeugen oder Passagierschiffen) zu einem

---

<sup>6</sup> Landes-Raumordnungsprogramm Niedersachsen 1994. Schriften der Landesplanung Niedersachsen. Hannover

<sup>7</sup> Projektbeschreibung siehe <http://www.flintenbreite.de>

*Gärbehälter* transportiert. Dort können auch Bioabfälle eingeworfen werden. Es kann Biogas für die Nutzung in einem BHKW abgezweigt werden. Das Regenwasser wird über Mulden vor Ort versickert. Das Grauwasser von Dusche und Waschmaschine wird über bepflanzte Bodenfilter behandelt. Mulden und Pflanzenkläranlagen tragen zur naturnahen Gestaltung des Freiraumes bei.

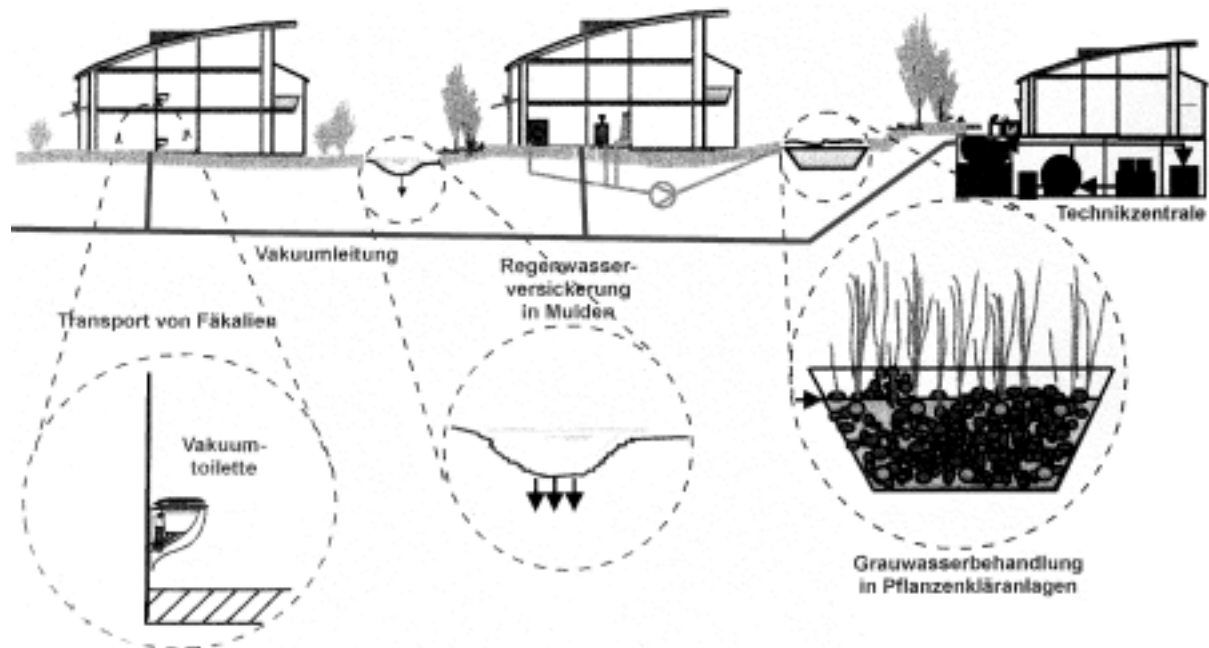


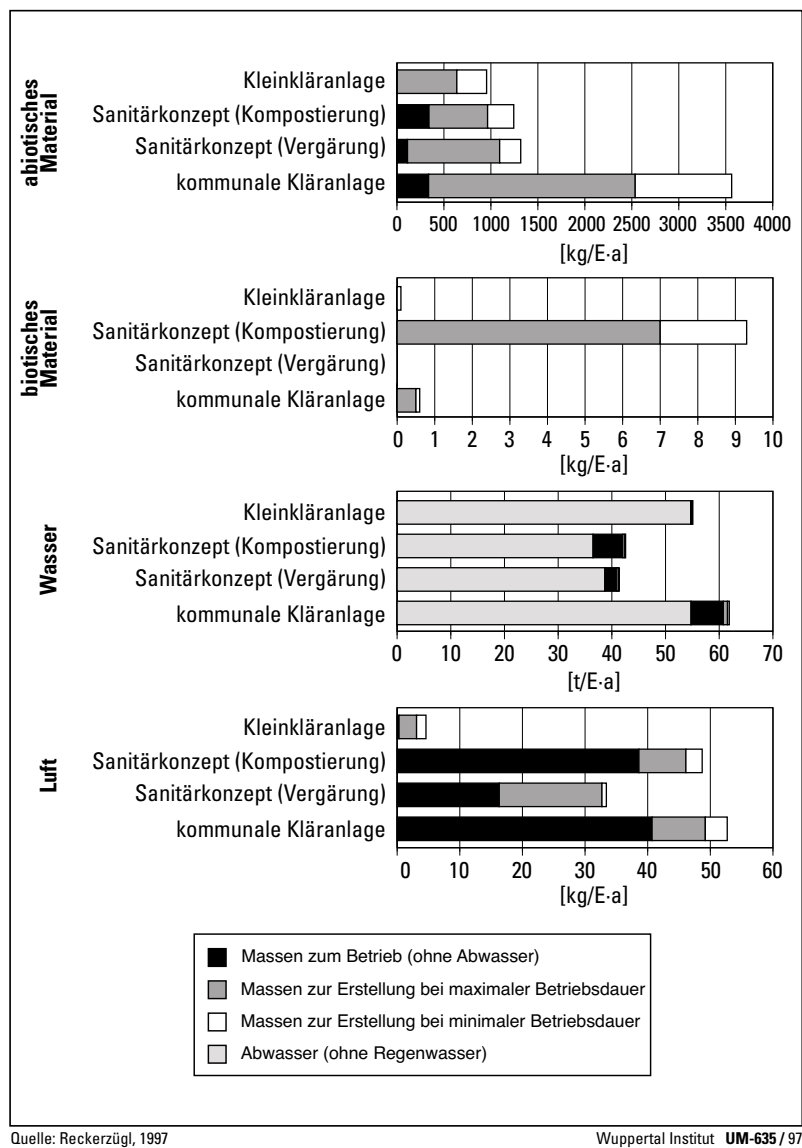
ABB. 4. Stoffstromseparation und Vakuumsystem zur semi-zentralen Sammlung und Behandlung von Siedlungsabwasser (Quelle: Otterpohl-Wasserkonzepte, siehe auch Otterpohl 1998).

In den Vergleich einbezogen wurde eine weitere *semizentrale Variante mit Kompostierung* der Fäkalien (VARIANTE 3) sowie eine dezentrale Variante mit einer *Dreikammerkläranlage*, wie sie im ländlichen Bereich üblich ist (VARIANTE 4).

Grundlage für die Berechnungen ist eine Entsorgungssituation für 15.000 Einwohner und damit eine Planungssituation, wie sie auch im Randbereich großer Städte gegeben sein kann. Dies erscheint für die Interpretation der Ergebnisse wichtig.

Als Serviceeinheit wurde die Behandlung und weitestgehende Nutzung der traditionell in Wasser eingeleiteten häuslichen Reststoffe unter Einhaltung der geltenden Einleitenvorschriften definiert. Der Materialaufwand wurde auf Personen und Jahr bezogen, - und nicht etwa pro m<sup>3</sup> Abwasser ausgewiesen (wie das häufig der Fall ist). Denn in einem solchen Fall würde die Materialintensität mit steigendem Abwasseranfall sinken, wodurch ein solcher Indikator in die

Irre leiten würde. Zudem wäre bereits implizit festgelegt, dass Abwasser entsteht, so dass abwasserfreie Varianten unberücksichtigt blieben.



Quelle: Reckerzügl, 1997

Wuppertal Institut UM-635/97

ABB. 5. Vergleichende Materialintensitäts-Analyse verschiedener Abwasserbehandlungssysteme (Reckerzügl und Bringezu 1998). Varianten Nr. 1 – 4 von unten nach oben angegeben (s. Text).

Die untersuchte kommunale Kläranlage wies eine Materialintensität pro Einwohner und Jahr auf, die bei ca. 3 bis 4 % des deutschen GMA liegt und zwischen 14 und 19 % des gesamten Aufwandes an Baumineralien und Aushub entspricht.

Bei der Kategorie abiotisches Material schneiden die Alternativsysteme um den Faktor 3 besser ab als die kommunale Anlage (ABBILDUNG 5). Den Ergebnissen der Kategorie biotisches Material ist aufgrund der geringen Mengen kaum Bedeutung beizumessen. Beim



Wasserverbrauch schneiden die semizentralen Systeme deutlich besser ab. Bei der Kategorie Luft - und damit auch bei der CO<sub>2</sub>-Emissionsintensität - schneidet die Kleinkläranlage am günstigsten ab gefolgt vom Vakuumsystem.

### Integriertes Ressourcenmanagement

Ein integriertes Ressourcenmanagement schließt bei einer umfassenden Systemsicht sowohl die Minimierung des Aufwandes natürlicher Ressourcen als auch die Verminderung von Emissionen entsprechend der Aufnahmekapazität der Umwelt ein (ABBILDUNG 6). Es ist generell sektorübergreifend und bezieht neben natürlichen auch ökonomische, technologische, organisatorische und generell auch soziale Ressourcen mit ein, die es im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung je nach den regionalen Potentialen optimiert zu nutzen gilt.

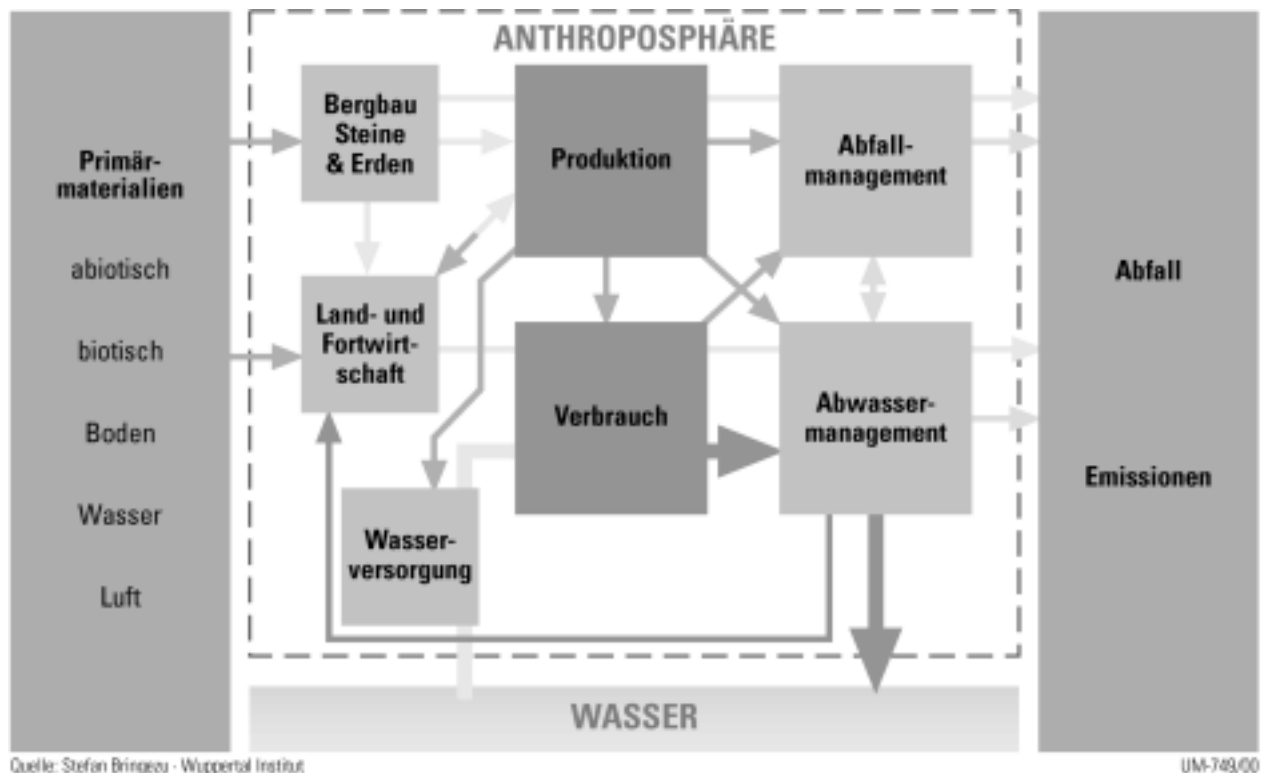


ABB. 6. Ein integriertes Ressourcenmanagement setzt eine umfassende Systembetrachtung voraus.

Die ersten Berechnungen ergaben, dass beim Neubau von Abwasserbehandlungssystemen die o.g. semizentralen und dezentralen Alternativen unter Kostenaspekten zumindest nicht schlechter abschneiden als ein herkömmliches zentrales System (TABELLE 1).

Kostenvergleich	Kommunale Kläranlage	Sanitärsystem mit Vergärung	Sanitärsystem mit Kompostierung	Kleinkläranlage
DM/E a	678 - 844	619	529	678

TAB. 1. Bau- und Betriebskosten im Vergleich (Reckerzügl und Bringezu 1998)

Berücksichtigt man, dass die Ablaufwerte von öko-toxischem Ammonium und Phosphat im Schnitt bei der Kleinkläranlage höher liegen als bei den anderen Systemen (TABELLE 2), so wären nach diesem zusätzlichen Aspekt eher die semi-zentralen Varianten zu bevorzugen.

Ablaufwerte (mg/l)	Kommunale Kläranlage	Grauwasserseparation	Kleinkläranlage
CSB	17,67	35,0	50,0
BSB <sub>5</sub>	3,14	10,0	5,0
P <sub>ges</sub>	0,26	0,5	3,0
NH <sub>4</sub> -N	0,27	1,0	5,0
N <sub>ges</sub>	5,98	<10,0	10,0

TAB. 2. Ablaufwerte zentraler, semizentraler und dezentraler Abwasserbehandlungssysteme (nach Reckerzügl 1997)

Dazu kommt, dass die semi-zentralen Systeme die Nährstoffgehalte der Fäkalien (welche die Hauptquellen von Phosphat und Stickstoff in häuslichen Reststoffen darstellen) in konzentrierter Form separat sammeln. Die gesammelte Nährstoffbrühe des Vakuumsystems oder der Kompost als solcher, welche zudem nicht durch Industrieabwässer z.B. mit Schwermetallen belastet sind, können auf landwirtschaftliche Flächen verbracht werden. Dadurch kann bei diesen Systemen auch ein höherer Grad an Nährstoffzyklisierung von Phosphor und Stickstoff stattfinden als beim kommunalen System oder auch der Kleinkläranlage.

Die sektorübergreifende Nutzung der Nährstoffe in der Landwirtschaft setzt dort allerdings eine entsprechende Nachfrage voraus. Diese ist bislang nur in beschränktem Maße gegeben. Denn die landwirtschaftlichen Flächen sind - aus verschiedenen Gründen - mit jenen Nährstoffen generell überversorgt. Die Landwirtschaft stellt selbst einen Teil eines im wesentlichen linearen Durchflusssystems dieser Stoffe dar, beginnend mit der Applikation von Mineraldünger, über die Ernte der Biomasse, deren Verzehr, den Eintrag ins Abwasser und in die Gewässer.

Eine eher nachhaltige stoffliche Versorgung wird künftig eine zunehmende zyklische Stoffführung - unter Minimierung des gesamten Ressourcenaufwandes - notwendig machen

und damit zunehmend auch die Kooperation bislang eher getrennt operierender Akteure (z.B. von Hausverwaltungen, Abwassermanagement und Landwirtschaft).

Dabei wird (1) die Rückführung von Nährstoffen aus dem Abfall- und Abwassermanagement zunehmend an Bedeutung gewinnen. Und hierbei werden (2) wiederum die ressourcenextensiven Prozessvarianten zu bevorzugen sein. Die Ergebnisse der Materialintensitätsanalysen können insofern dazu herangezogen werden, die an qualitativen Aspekten z.B. des Gewässerzustandes ausgerichteten Substanzflußanalysen z.B. zu Phosphor und Stickstoff zu ergänzen, und für die Planung solche Infrastrukturen auszuwählen, welche die qualitativen Risiken mit einem Minimum quantitativen Ressourcenaufwandes erreichen.

Die untersuchten semizentralen Abwasserbehandlungssysteme zeichnen sich nicht zuletzt durch einen geringen Wasserbedarf aus. Damit könnten diese Systeme insbesondere in Ländern wie in Süd- und Südosteuropa einen wichtigen Beitrag zu einem ressourceneffizienten Wassermanagement beitragen. Denn dort ist eine entsprechende Infrastruktur erst noch aufzubauen. Dort gilt es, auch mit Wasser besonders sparsam umzugehen, und die ländlichen Gepflogenheiten der Rückführung von Fäkalien auf die Felder entsprechen noch eher einer alten Sitte als in Mitteleuropa. Inwieweit dabei eher einfache Technologien wie die Komposttoilette oder technisch anspruchsvollere Varianten wie das Vakuumsystem den regionalen Gegebenheiten von Verbraucherverhalten und handwerklichem Können entsprechen, wird zu prüfen sein.

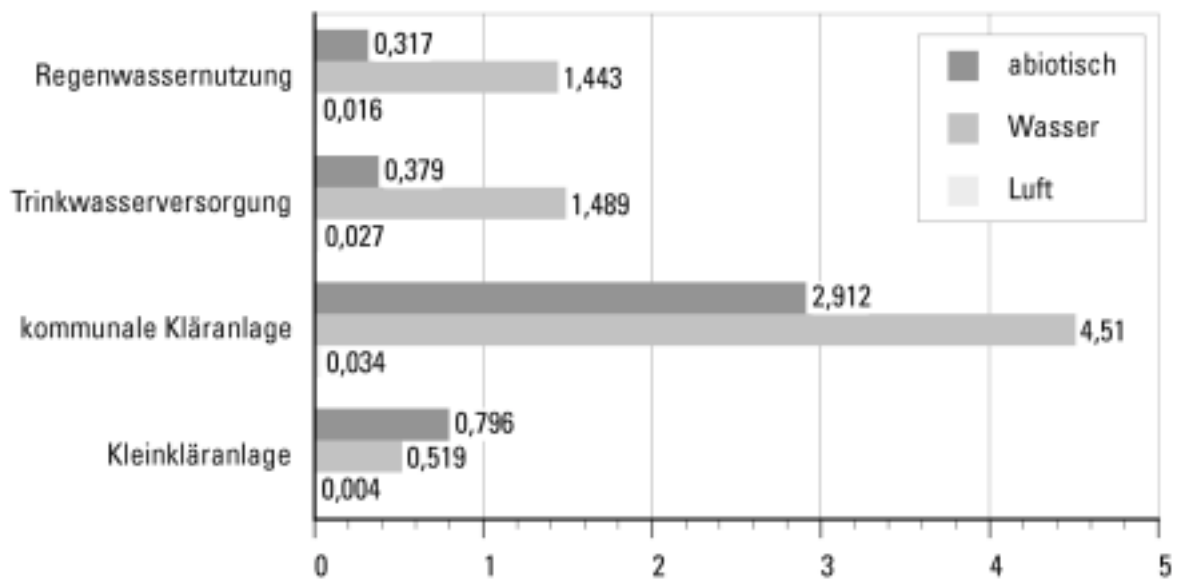
Integriertes Ressourcenmanagement schließt neben der Berücksichtigung von alternativen Ver- und Entsorgungssystemen auch den Einsatz von Effizienz- und Vermeidungstechnologien in der Nutzungsphase ein. Dies soll am Beispiel der Analyse der Regenwassernutzung erläutert werden.

Boermans-Schwarz (1998) untersuchte die Materialintensität typischer Anlagen der Regenwassernutzung sowie der Trinkwasserversorgung und kombinierte die Ergebnisse mit den Analysedaten zu verschiedenen Klärsystemen (ABBILDUNG 7).

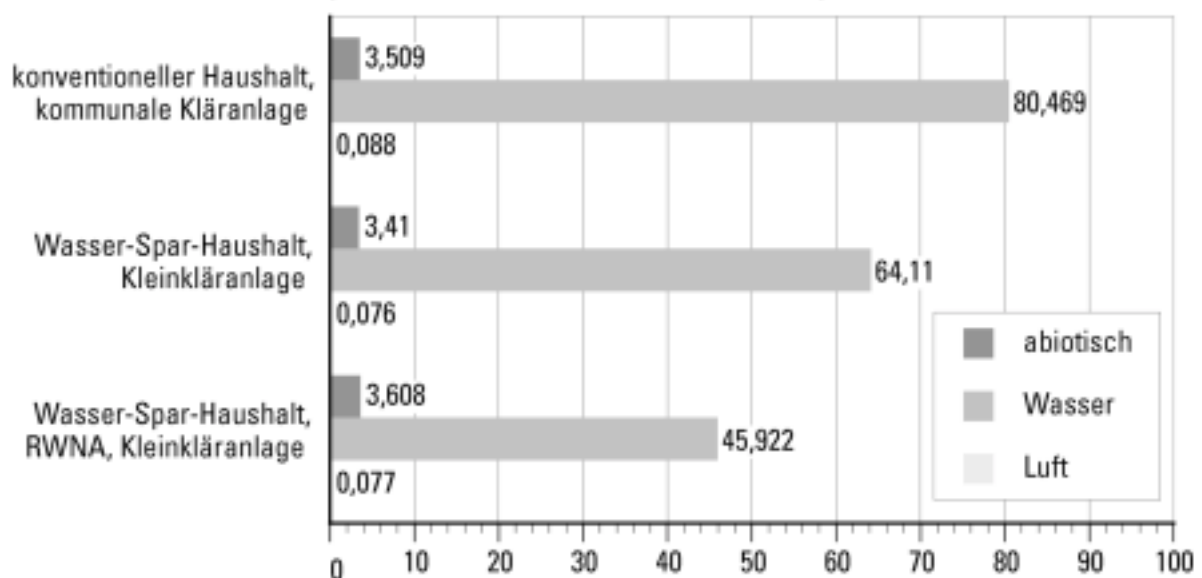
Nimmt man das kommunale Klärsystem als Vergleichsbasis, so stellt sich die Frage, ob sich der zusätzliche Einbau einer Regenwassernutzungsanlage unter Gesichtspunkten der Materialintensität lohnt. Die Errichtung und der Betrieb einer solchen Anlage führen zwar stets zu einer Verminderung des gesamten Wasseraufwands, dafür werden aber zusätzliche Inputs an abiotischen Materialien und Luft (gekoppelt mit einem leichten CO<sub>2</sub> Emissionsanstieg) benötigt. Dieser zusätzliche Ressourcenaufwand wird eher in Regionen mit angespannter Wasserverfügbarkeit zu rechtfertigen sein als in emissionsintensiven Regionen mit reichem Wasserangebot.

Die Nutzung von Einspartechnologien wie Wasserspararmaturen, die im vorliegenden Fall zu einem Verbrauch von ca. 100 l pro Person und Tag anstelle von 140 l führten, ist dagegen mit einer Verminderung von allen drei Hauptinputkategorien verbunden. Dies ist nur eines von vielen Beispielen, dass ein nachhaltiges Ressourcenmanagements nicht allein auf veränderte Technologien der Ver- und Entsorgung setzen sollte, sondern auch die Möglichkeiten des Demand-Side-Managements einbeziehen muss.

### MIPS der Systemteile zur Ver- und Entsorgung von Regenwasser [t/Ea]



### MIPS der zentralen Ver- und Entsorgung: effizienter Verbrauch vs. Regenwassernutzung [t/Ea] (inkl. Trinkwasser und Dachablaufwasser)



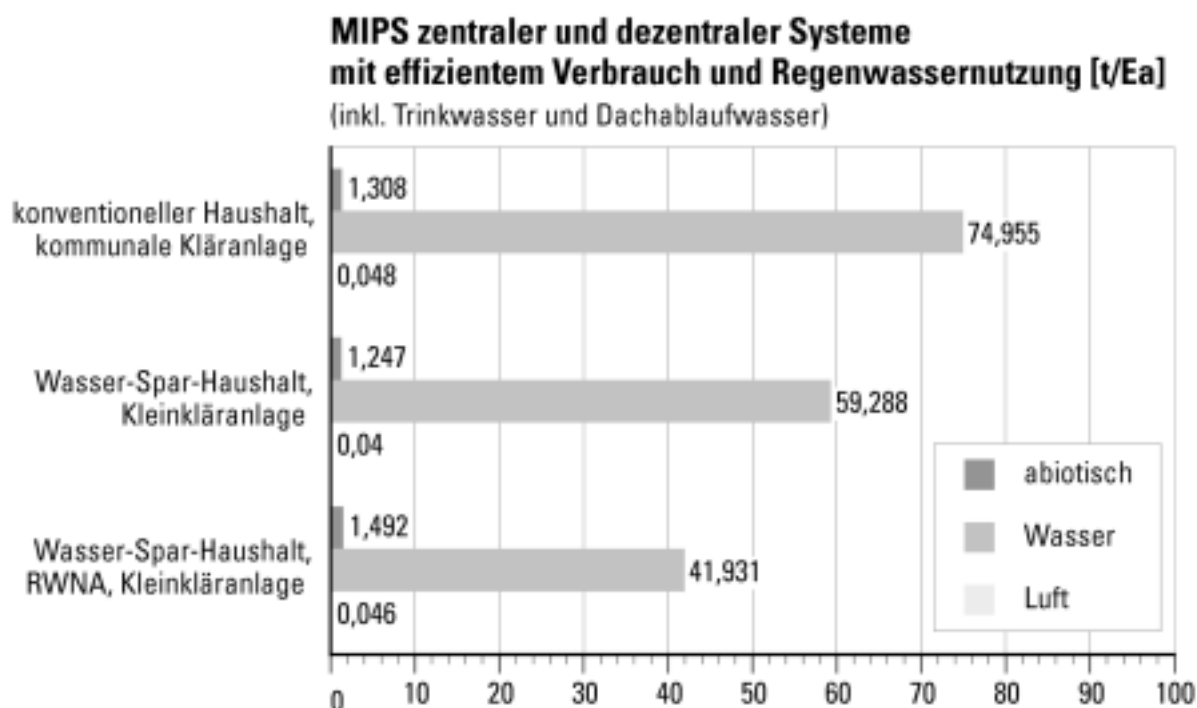


ABB. 7. Materialintensität unterschiedlicher Kombinationen von Systemen zur Ver-, Entsorgung und Nutzung von Wasser (nach Boermans-Schwarz 1998).

Auch die Verzahnung der verschiedenen Infrastruktursysteme, z.B. die Energieversorgung für die Abwasserbehandlung, und ihre zeitliche Dynamik sind für ein integriertes Ressourcenmanagement zu berücksichtigen. Würde beispielsweise der Ventilator, der beim System der Komposttoilette Tag und Nacht läuft, um Geruchsbelästigungen zu vermeiden, durch Windenergie getrieben (und das gleiche gälte auch für die Alternativprozesse), so würde diese Technologie in der Gesamtbewertung im Vergleich zum Vakuumsystem weniger abfallen.

Bei einer integrierten Betrachtung von Ver- und Entsorgungssystemen können sich je nach Planungssituation und Zeithorizont unterschiedliche Bewertungen ergeben. So wurden verschiedene Szenarien im Bereich des gekoppelten Wasser-, Abfall und Energieversorgungsmanagements untersucht (Bringezu 1998). Beispielsweise wurde der Frage nachgegangen, inwieweit die Verbrennung von Klärschlamm bei Substitution von Kohle für die Stromerzeugung oder die Recyclierung von Klärschlamm in der Landwirtschaft bei Substitution von Mineraldünger ökologisch sinnvoll ist. Zunächst wurde dabei nur die Emissionsintensität von CO<sub>2</sub> untersucht. Diese lässt sich kurz- bis mittelfristig bei einer Verbrennungslösung mindern, langfristig ist jedoch die Recyclierungsvariante und eine Stromversorgung auf der

Basis erneuerbarer Energien zu bevorzugen. Es bleibt zu prüfen, welche Alternativen sich bei einer vollständigen MAIA ergeben würden.

## Schlußfolgerungen

1. Mit Hilfe der Materialintensitäts-Analyse (MAIA) ist es möglich, den kumulierten Materialaufwand von Produkten und Dienstleistungen im Allgemeinen und von Anlagen und Infrastruktursystemen im Besonderen zu bestimmen. Durch die Ermittlung der Material-Input-pro-Service-(MIPS)-Werte kann der Material Input in Relation zum gewünschten Nutzen gesetzt werden, um auf diese Weise die Materialeffizienz anthroposphärenweit zu erhöhen.
2. Die Ergebnisse der MAIA indizieren ein allgemeines wirkungsunspezifisches Umweltbelastungspotential, das im wesentlichen vom Umfang der induzierten Massenströme der Ressourcenentnahme bestimmt wird. Spezifische Wirkungen wie Toxizitäten oder physikochemische Wirkungen von Emissionen können damit nicht abgebildet werden.
3. Die MAIA stellt damit Informationen bereit, deren Berücksichtigung im Sinne eines vorsorgeorientierten nachhaltigen Ressourcenmanagements als notwendig jedoch nicht als hinreichend betrachtet werden können. Sie liefert nichtsdestoweniger einen wichtigen Beitrag zu einem sektorübergreifenden integrierten Ressourcenmanagement und zur nachhaltigen Gestaltung der physischen Basis menschlichen Wirtschaftens.

## Literatur:

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (1998): Nachhaltige Entwicklung in Deutschland - Entwurf eines umweltpolitischen Schwerpunktprogramms. Bonn

Boermans-Schwarz, T. (1998): Materialintensitäts-Analyse von Anlagen zur Nutzung von Regenwasser im Haushalt im Kontext einer nachhaltigen Wasserwirtschaft. Diplomarbeit am Fachbereich Sicherheitstechnik der Bergischen Universität Gesamthochschule Wuppertal

Bringezu, S. (2000): Ressourcennutzung in Wirtschaftsräumen. Berlin, Heidelberg, New York

Bringezu, S. (1998): Material Flow Analyses Supporting Technological Change and Integrated Resource Management. In: R. Kleijn, S. Bringezu, M. Fischer-Kowalski, V. Palm (Ed.): Ecologizing Societal Metabolism. Designing Scenarios for Sustainable Materials Management. Proceedings of the ConAccount Workshop Nov. 21st 1998, Amsterdam. CML report 148, Leiden University

Bringezu, S., Stiller, H., Schmidt-Bleek, F. (1996): Material Intensity Analysis - A Screening Step 0 for LCA. Concept, Method and Applications. Proceedings of the 2nd International Conference on EcoBalance, Nov. 18-20, 1996, Tsukuba, Japan: 147-152

Otterpohl, R. (1998): Wasserwirtschaft in urbanen Räumen - Anforderungen und Lösungsansätze zur Nachhaltigkeit. Schriftenreihe Wasserforschung 3: 85 - 100

Reckerzügl, T. (1997): Vergleichende Materialintensitätsanalyse zur Frage der zentralen und dezentralen Abwasserbehandlung anhand unterschiedlicher Anlagenkonzepte. Diplomarbeit an der Universität Gesamthochschule Paderborn, Abt. Höxter, Fachbereich Technischer Umweltschutz, Paderborn

Reckerzügl, T., Bringezu, S. (1998): Vergleichende Materialintensitätsanalyse verschiedener Abwasserbehandlungssysteme. Wasser - Abwasser gwf 139 Nr. 11: 706-713

Reckerzügl, T., Bringezu, S., Lindert, M. (2000): Vergleich der CO<sub>2</sub>-Bilanzen zwischen landwirtschaftlicher und thermischer Klärschlammverwertung. Wasser & Boden, in Druck

Schmidt-Bleck, F.; Bringezu, S.; Hinterberger, F.; Liedtke, C.; Stiller, H.; Spangenberg, J. Welfens, M.-J. (1998): MAIA. Einführung in die Material Intensitäts Analyse nach dem MIPS-Konzept. Wuppertal Texte. Berlin, Basel, Boston